



MilliNewton – Ajustement passif & qualification RoHS (suite)

Résumé. Ce document donne les résultats de l'ajustement passif d'une 3e série (après 06-5xx [1,2] et 06-6xx [3]) de l'embase MilliNewton, version E, dans le cadre d'une nouvelle production de 1'500+ pièces de MilliNewton A. Ici, l'étude précédente (sur 06-6xx), où des résistances 10 / 100 kΩ RoHS avaient été introduites, est approfondie pour une qualification des compositions les plus prometteuses et de leur ajustement laser.

Selon ces tests, les nouvelles compositions, à savoir ESL 9635G (conducteur, Ag:Pd 3:1 avec fritte de verre, sans plomb), Heraeus (Her) R8941 (10 kΩ) et Her R8951 (100 kΩ) peuvent remplacer les compositions existantes. De plus, les trois verrages sans Pb, Her CL90 8325, ESL G 485 et ESL 4771P1, fonctionnent bien. Le remplacement sera validé complètement par des études sur les capteurs complets (tenue mécanique, stabilité de l'offset lors des étapes finales et après, etc.).

Thomas Maeder, 3.4.2007.

Projet: MilliNewton ; RoHS

Mots-clefs: MilliNewton, capteur de force, RoHS, sans plomb, ajustement, caractérisation.

Table des matières

1. INTRODUCTION	2
2. TESTS.....	3
3. RESULTATS	5
4. CONCLUSIONS.....	13
5. REFERENCES	13

1. Introduction

La version E de l'embase MilliNewton (layout en figure 1) est la dernière évolution avant de passer à la version du produit à poutre bumpée. Le schéma est encore classique (amplificateur "DT400", figure 2). La "feuille de route" technologique envisagée actuellement pour l'évolution de MilliNewton est donnée au tableau 1.

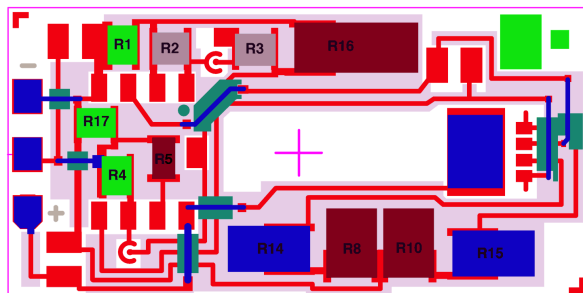


Figure 1. Layout de l'embase E (verrage en semi transparence).

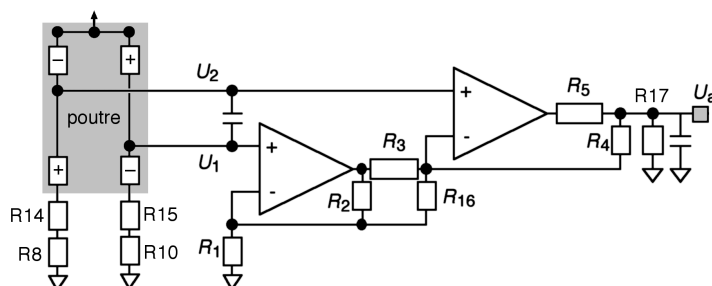


Figure 2. Schéma électrique de l'embase MilliNewton (U_a = sortie).

Etape	Etat
Mise en conformité RoHS et passage au sans plomb	<p>Fait :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1^{ère} étude sur embases mN RoHS (série 06-6xx) <p>En cours :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2^e étude approfondie des résistances choisies (ce rapport) avec verrages sans plomb - avec conducteur sans plomb (nouveau) - qualification de test patterns standard
Nouvelle version bumpée	<p>En cours</p> <ul style="list-style-type: none"> - poutre bumpée en production - layout de l'embase bumpée finalisé - poutre monoface envisagée - attente décision des clients pour instruments médicaux
Nouvel amplificateur	Envisagé pour 2 ^e version de l'embase bumpée

Tableau 1. Feuille de route pour l'évolution de MilliNewton.

2. Tests

2.1. Programme

Les essais ont porté sur quatre sets d'embases (tableau 2). Le 1^{er} set (07-100...149, données analysées sur 07-100...109) est entièrement standard, alors que les trois autres utilisent le conducteur sans plomb (ESL 9635G) et la paire de résistances Her R8941 / R8951, et ne diffèrent que par l'étape de verrage (tableau 3), et de recuit après ajustement (qui se fait à la même température que celle de verrage). Par rapport à l'étude précédente, on a un beaucoup plus grand nombre de substrats mesurés : 10 + 10 + 5 + 5. Une petite différence aussi pour le verrage ESL 4771-P1 : il est cuit à 550°C au lieu de 525°C (plus de marge de processus).

Les compositions DuPont (DP) 2021 et ESL 2612I donnent à présent entière satisfaction pour les gammes 100 Ω et PTC 100 Ω , et n'ont donc pas été changées.

La séquence des opérations est donnée ci-dessous :

- Sérigraphie & cuisson des couches de métallisation (ESL 9635B) et diélectrique (ESL 4913).
- Sérigraphie et co-cuisson des 4 compositions résistives, pour les gammes 100 Ω , 10 k Ω , 100 k Ω et PTC 100 Ω → mesure à l'état cuit (certains échantillons).
- Sérigraphie et cuisson du verrage → mesure à l'état verré, mais non ajusté.
- Ajustement laser → mesure à l'état ajusté.
- Traitement de recuit (même profil que la cuisson du verrage) → mesure à l'état ajusté et recuit.

Set	1 (standard)	2	3	4
Conducteur	ESL 9635B	ESL 9635G	ESL 9635G	ESL 9635G
Résistance 10 kΩ R2, R3	DP 2041	Her R8941	Her R8941	Her R8941
Résistance 100 kΩ R1, R4, R17	ESL 3915	Her R8951	Her R8951	Her R8951
Verrage & température	ESL G-481 580°C	Her CL90-8325 600°C	ESL G-485 600°C	ESL 4771-P1 550°C
Substrats (07-)	100...149	150...159	160...164	165...169

Tableau 2. Combinaisons de résistances testées (autres résistances : standard).

R5, R8, R10, R14, R15, R16 : DP 2021 (100 Ω)

R8, R10 : ESL 2612I (PTC 100 Ω / 2'300 ppm/K)

Verrage	Cuisson & recuit plateau & profil four à bande
ESL G-481 (std.)	580°C 10 min / 58045MN (std.)
ESL 4771-P	550°C 10 min / 55045MN
ESL G-485-1	600°C 10 min / 60045MN
Her CL90-8325	600°C 10 min / 60045MN

Tableau 3. Verrages testés et profils de cuisson.

2.2. Ajustement laser

Valeurs-cibles

Les valeurs nominales (à atteindre) des résistances sont données au tableau 4. Elles sont inchangées par rapport à la série précédente 06-6xx [3].

Rés.	Valeur nominale & précision	Notes
R1, R4	100 k Ω \pm 2%	Apparier R1 & R4 ; +25% OK
R2, R3	10 k Ω \pm 2%	Apparier R2 & R3 ; +10% OK
R16	400 Ω \pm 5%	Pas critique (ici : gain initial = 500) Ensuite, ajustement actif du pan -
R5	200 Ω \pm 15%	pas critique (charges capacitives)
R17	200 k Ω \pm 25%	pas critique (pull-down)
R8, R10	-	Ajustement actif de l'offset +,-
R14, R15	-	Ajustement actif du TCO +,-

Tableau 4. Résistances, compositions, valeurs nominales et précisions.

Paramètres globaux d'ajustement

Ces paramètres sont identiques à ceux fixés lors de l'étude précédente [3] :

- **Laser.** La puissance est fixée à 65%, et la fréquence à 5 kHz.
- **Vitesse / galvo.** Les deux vitesses sont 4 mm/s (vitesse rapide) et 0.5 mm/s (vitesse réduite), avec réduction proportionnelle de la fréquence laser en mode lent.
- **Dépassement des valeurs cibles.** Pour les paires R1/R4 et R2/R3, un dépassement des valeurs de respectivement +20% et +10% est toléré. Dans ce cas, la résistance la plus faible est ajustée à la valeur de la plus élevée, avec les mêmes tolérances que pour l'ajustement normal (problème surtout avec ESL 3915).
- **Tentatives.** En cas d'échec, l'ajustement d'une embase est tenté une 2^e fois. Cette nouveauté permet d'éviter les dépassements occasionnels de la valeur cible, quasiment impossibles à éviter totalement pour R2/R3 et surtout pour R1/R4 en raison de la large distribution des valeurs initiales. On ajuste alors (voir ci-dessus) la résistance la plus petite à la valeur de la plus grande.
- **Recuit.** Comme dans les versions précédentes, les embases ajustées sont recuites avec le profil de cuisson du verrage, selon le verrage utilisé.

Paramètres spécifiques

Les valeurs nominales et paramètres spécifiques sont donnés pour chaque résistance au tableau 5, et sont identiques pour chaque paire (R2/R3 et R1/R4). Ces paramètres sont repris inchangés de la dernière série, 06-6xx.

Rés.	Géométrie	Valeur nominale [kΩ]	L [mm]	D [mm]	A [mm]	N	TP [%]	RP [%]	PS [%]
R5	Méandre	0.200	1.1	0.5	1.7	2	-30	-7	-0.5
R16	U	0.400	3.5	0.4			-14	-4	-2.0
R2	Double	10	1.4	0.4			-23	-13	-1.1
R3	Double	10	1.4	0.4			-23	-13	-1.1
R1	Double	100	1.7	0.4			-22	-14	-1.0
R4	Double	100	1.7	0.4			-22	-14	-1.0
R17	Méandre	200	1.2	0.6	1.9	2	-25	-13	-1.0

Tableau 5. Paramètres d'ajustement : géométrie et comparateurs.

L = longueur maximale de coupe ; D = décalage entre coupes parallèles / opposées, ou largeur du U ;

A = Distance d'alternance de points de départ (méandres) ; N = nombre maxi de coupes (méandres).

TP (*turnpoint*) : changement de direction ou de coupe.

RP (*reduction point*) : réduction de vitesse (avec réduction proportionnelle de fréquence).

PS (*prestop*) : arrêt de l'ajustement.

3. Résultats

3.1. Epaisseurs

Les épaisseurs des résistances et des verrages sont données au tableau 6, avec les paramètres de sérigraphie. Par rapport à la série 06-xxx, l'épaisseur de l'émulsion de Her R8951 a été réduite, afin de diminuer la quantité de pâte, et de rehausser la valeur. Cependant, à terme, il serait préférable de normaliser les géométries afin de pouvoir travailler avec 325/30 ou 325/40 pour les deux compositions, 10 et 100 kΩ.

Pâte	Trame [mesh]	Emulsion [μm]	Humide [μm]	Sec [μm]	Cuit [μm]
DP 2021	325	40	32	17	10
DP 2041	325	50	42	23	15
Her R8941	325	50	43	24	14
ESL 3915	325	40	34	22	12
Her R8951	325	30	23	15	8
ESL 2612I	325	40	43	23	16
ESL G-481*	325	30	25	15	8
ESL G-485*	325	30	24	12	5
ESL 4771P1*	325	30	22	9	4
Her CL90-8325*	325	30	28	19	12

Tableau 6. Epaisseurs des résistances et des verrages (& masques utilisés).

Paramètres de sérigraphie (approx.) : 50 mm/s et 2 bar.

* Epaisseurs des verrages reprises de la série 06-xxx [3].

3.2. Valeurs initiales & variation au verrage

Les valeurs initiales avec et sans verrage sont données aux figures 3 et 4, et les données pour les variations relatives au verrage sont données au tableau 7.

- **DP 2021 (100 Ω).** On remarque quelques valeurs anormalement élevées, possiblement dues à des effets de trame au voisinage d'un plot de diélectrique ou à des problèmes de planéité des substrats. A part ce problème, cette résistance pose peu de difficultés, et est compatible avec tous les 4 verrages.
- **DP 2041 & Her R8941 (10 k Ω).** Les valeurs sont un peu trop élevées, malgré l'émulsion de 50 μ m, et la valeur de R3 est constamment plus élevée que celle de R2 (adapter le layout), mais la dispersion est faible. Au verrage, les 4 sets évoluent peu, avec un léger avantage pour Her 8941.
- **ESL 3915 & Her R8951 (100 k Ω).** Comme dans l'étude précédente, l'écart type de ESL 3915 à la fabrication est élevé, alors qu'il est tout à fait normal pour Her R8951. La compatibilité de ESL 3915 avec le verrage ESL G-481 est bonne, mais Her R8951 fait mieux, sans qu'on puisse départager les 3 verrages sans Pb.

Pour les résistances RoHS, cette étude confirme donc la précédente, et cela avec un plus grand nombre d'échantillons et avec des terminaisons sans Pb.

Pâte rés.	Verrage	Rés.	Moyenne [%]	Ecart type [%]	Min [%]	Max [%]
DP 2021	ESL G-481	R5	-1.4	0.1	-1.7	-1.1
DP 2021	Her CL90-8325	R5	-0.0	0.1	-0.3	+0.2
DP 2021	ESL G-485	R5	-1.0	0.1	-1.3	-0.8
DP 2021	ESL 4771-P1	R5	-1.7	0.1	-1.9	-1.5
DP 2041	ESL G-481	R2	-4.0	0.1	-4.4	-3.7
DP 2041	ESL G-481	R3	-3.9	0.1	-4.3	-3.6
Her R8941	Her CL90-8325	R2	-2.5	0.1	-2.7	-2.3
Her R8941	Her CL90-8325	R3	-2.3	0.1	-2.5	-1.9
Her R8941	ESL G-485	R2	-3.1	0.1	-3.4	-2.9
Her R8941	ESL G-485	R3	-3.0	0.1	-3.2	-2.8
Her R8941	ESL 4771-P1	R2	-2.9	0.1	-3.1	-2.7
Her R8941	ESL 4771-P1	R3	-2.9	0.1	-3.0	-2.7
ESL 3915	ESL G-481	R1	+4.5	0.5	+3.2	+6.1
ESL 3915	ESL G-481	R4	+4.6	0.5	+3.3	+6.2
Her R8951	Her CL90-8325	R1	-4.0	0.1	-4.4	-3.5
Her R8951	Her CL90-8325	R4	-3.9	0.2	-4.3	-3.2
Her R8951	ESL G-485	R1	-5.4	0.2	-5.9	-4.8
Her R8951	ESL G-485	R4	-5.2	0.2	-5.8	-4.7
Her R8951	ESL 4771-P1	R1	-5.4	0.1	-5.6	-5.0
Her R8951	ESL 4771-P1	R4	-5.4	0.1	-5.7	-4.9

Tableau 7. Variation au verrage des résistances, non ajustées.

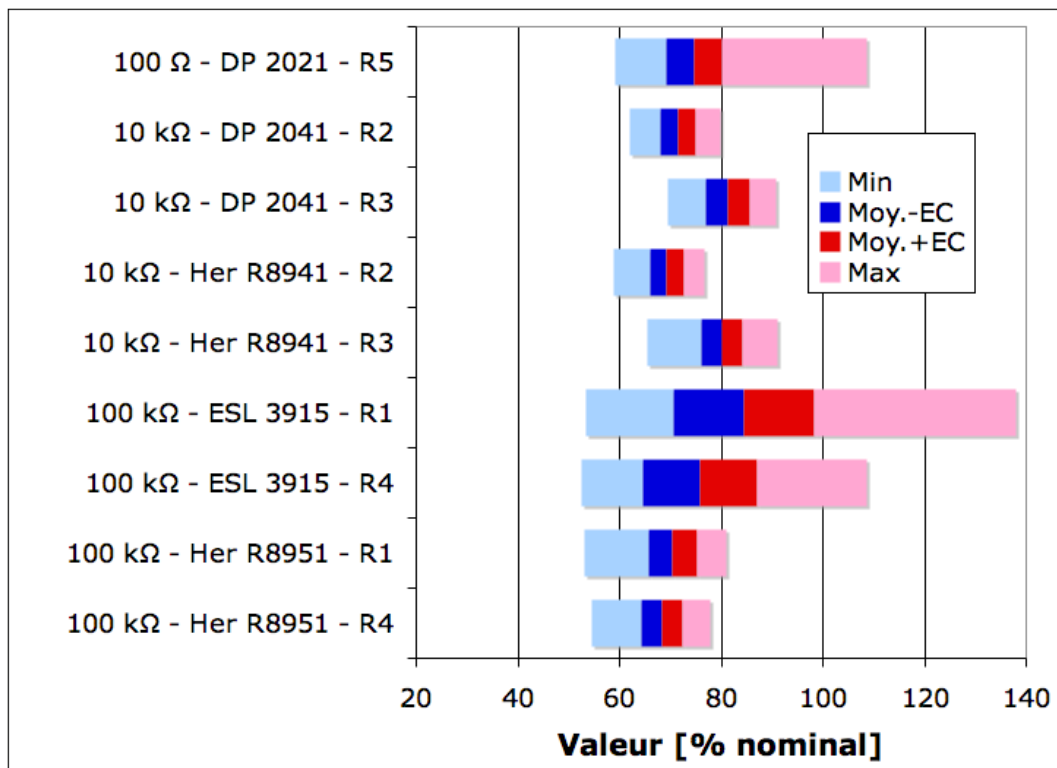


Figure 3. Résistances non verrées, à l'état sérigraphié et cuit.

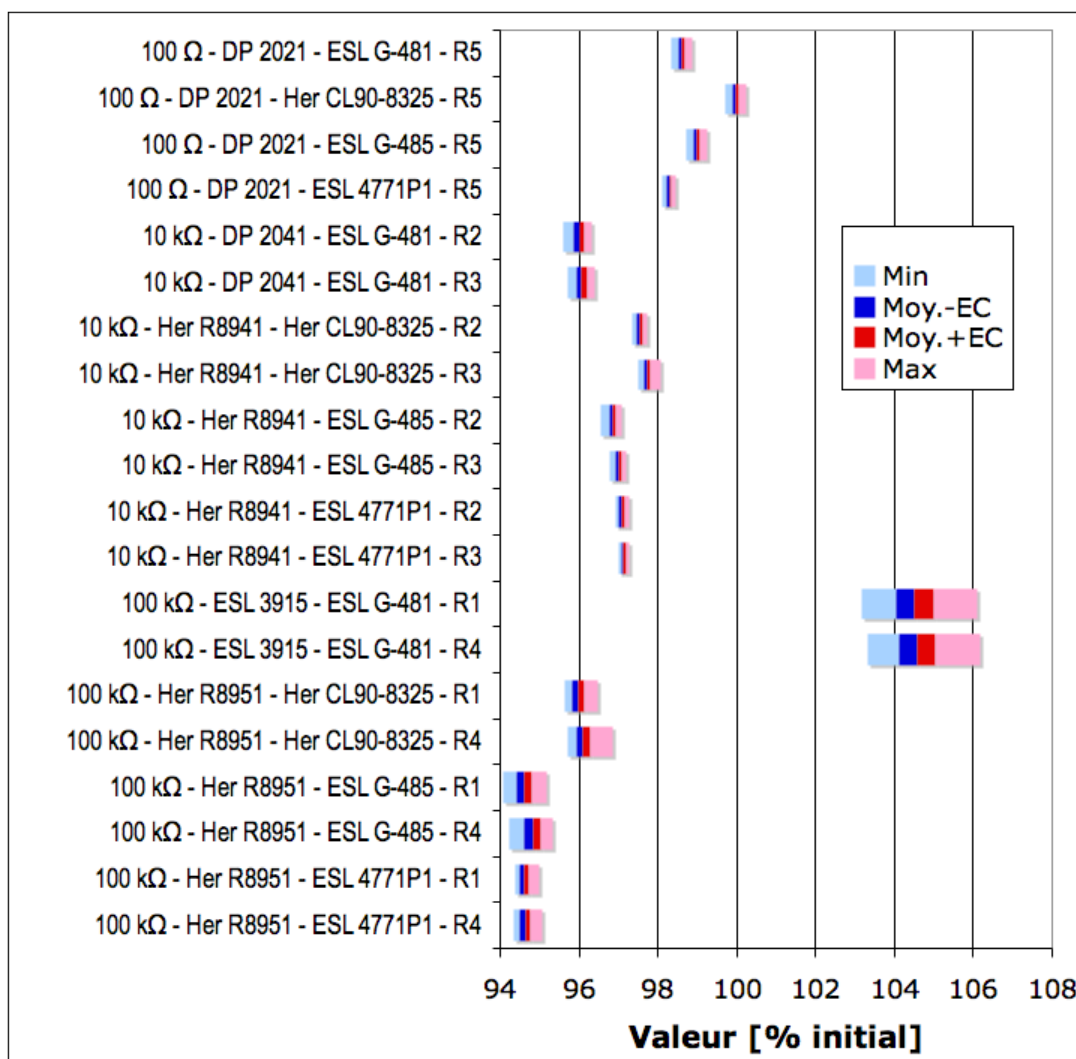


Figure 4. Variation au verrage des résistances.

3.3. Résultats – valeurs ajustées

Les résultats de l'ajustement sont représentés au tableau 8 et à la figure 5. Comme on tolère un léger "débordement" des valeurs absolues pour les paires R1 / R4 et R2 / R3 (résistances appariées), on donne les rapports pour ces résistances.

- **DP 2021.** Cette composition, en accord avec tous les essais précédents, permet un ajustement précis et stable. Ici, les quelques valeurs un peu plus élevées sont dues à un ajustement sans précautions au niveau de la programmation (vu que la valeur de R5 n'est pas du tout critique). On ne discerne pas de différence notable entre les verrages.
- **DP 2041 & Her R8941 (10 kΩ).** DP 2041 et Her R8941 ont des propriétés comparables à l'ajustement, qui a un léger biais ($R2 > R3$), dû vraisemblablement à la géométrie un peu différente de ces résistances. Ici aussi, on ne peut vraiment départager les verrages.
- **ESL 3915 & Her R8951 (100 kΩ).** L'ajustement de ces résistances est bon, avec peu d'influence du verrage et un peu plus de dispersion qu'avec les compositions 10 kΩ, ce qui est normal.

Pâte rés.	Verrage	Rés.	Moyenne [%]	Ecart type [%]	Min [%]	Max [%]
DP 2021	ESL G-481	R5	+0.2	0.2	-0.3	+0.9
DP 2021	Her CL90-8325	R5	+0.2	0.3	-0.4	+2.0
DP 2021	ESL G-485	R5	+0.2	0.2	-0.4	+0.8
DP 2021	ESL 4771-P1	R5	+0.2	0.5	-0.3	+3.6
DP 2041	ESL G-481	R2 / R3	+0.7	0.8	-1.9	+2.7
Her R8941	Her CL90-8325	R2 / R3	+0.7	0.6	-1.0	+2.2
Her R8941	ESL G-485	R2 / R3	+0.5	0.6	-1.0	+2.0
Her R8941	ESL 4771-P1	R2 / R3	+0.7	0.6	-0.7	+2.0
ESL 3915	ESL G-481	R1 / R4	-0.1	0.9	-2.6	+2.2
Her R8951	Her CL90-8325	R1 / R4	+0.1	1.0	-2.5	+3.0
Her R8951	ESL G-485	R1 / R4	+0.0	1.1	-3.1	+3.5
Her R8951	ESL 4771-P1	R1 / R4	+0.0	1.0	-2.2	+2.4

Tableau 8. Résistances ou rapports de résistances, à l'état verré & ajusté (p.r. valeur nominale).

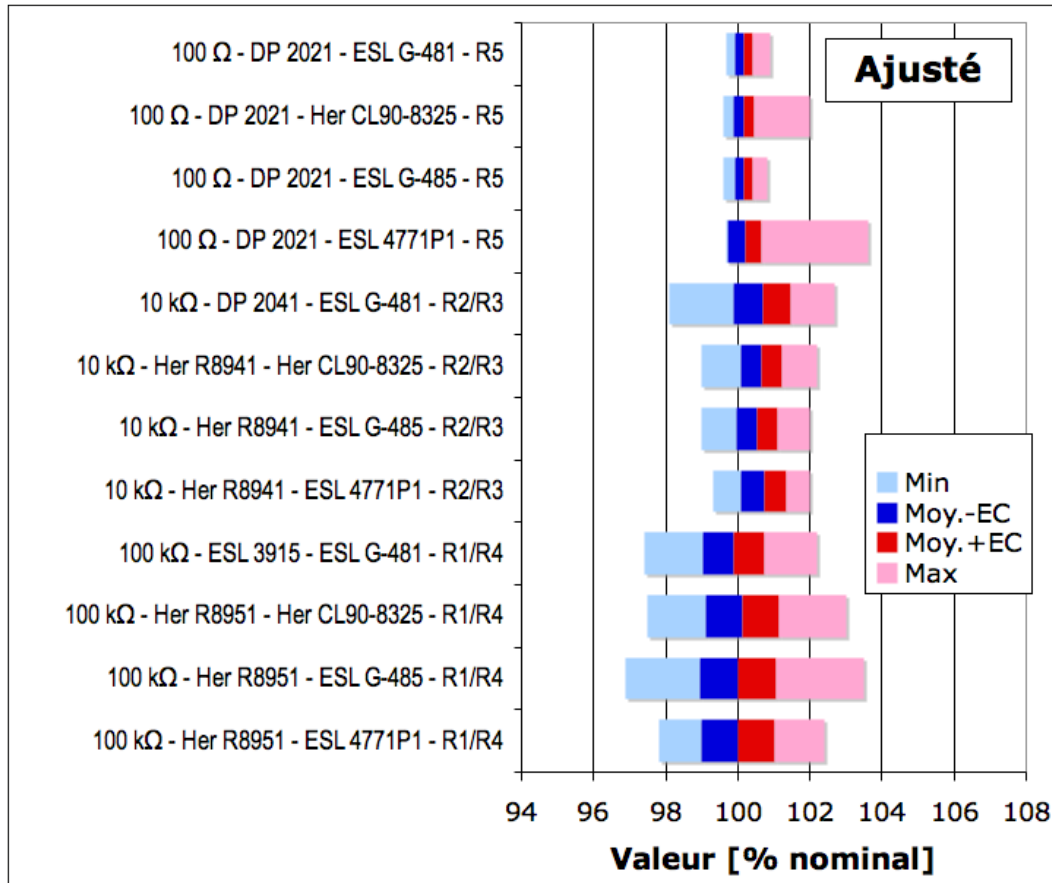


Figure 5. Résistances ou rapports de résistances, à l'état verré & ajusté.

3.4. Effet du recuit de stabilisation

Les décalage de valeur observé au recuit de stabilisation (à la température de cuisson du verrage) sont donnés à la figure 6, et les valeurs finales, à l'état ajusté et recuit, sont données au tableau 9. Ici également, on utilise les rapports pour les paires R1 / R4 et R2 / R3.

- **DP 2021.** L'altération est faible et très reproductible, pour tous les verrages.
- **DP 2041 & Her R8941 (10 k Ω).** La variation au recuit de Her R8941 est un peu plus faible que celle de DP 2041 ; les dispersions finales de R2 / R3 sont meilleures, avec peu d'influence du verrage.
- **ESL 3915 & Her R8951 (100 k Ω).** Ici, on constate un léger avantage de ESL 3915 sur Her R8951, en matière de stabilité au recuit. Cependant, comme la relation inverse avait été constatée sur la série 06-xxx [3], on peut supposer que la stabilité de Her R8951 est potentiellement bonne, moyennant une optimisation spécifique des paramètres du laser (qui ont ici été simplement repris), notamment pour tenir compte du changement d'épaisseur (plus mince par rapport à la série précédente). Au final, les dispersions du rapport R1 / R4 pour les 4 sets d'échantillons sont comparables.

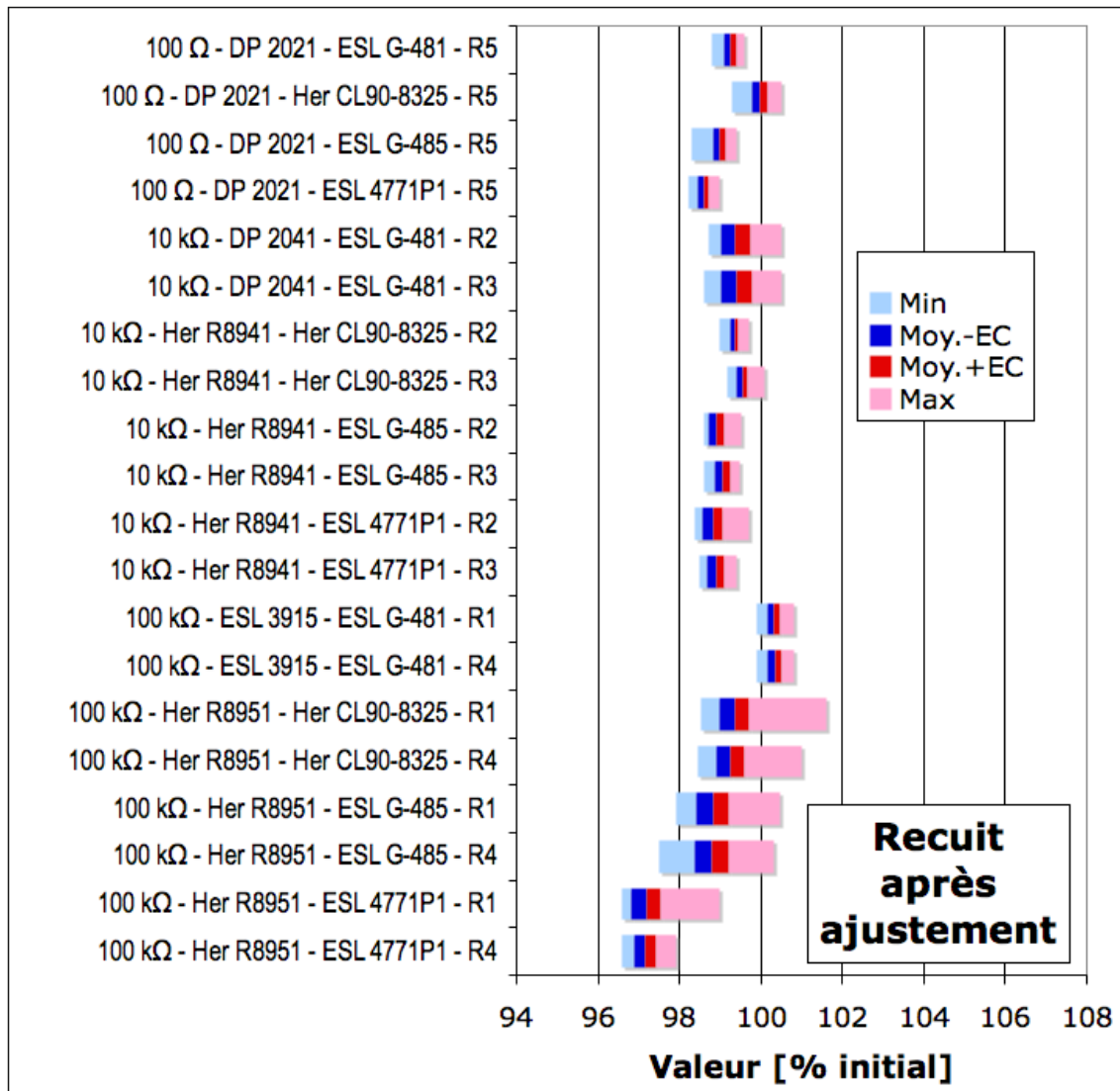


Figure 6. Décalage au recuit des valeurs des résistances.

Pâte rés.	Verrage	Rés.	Moyenne [%]	Ecart type [%]	Min [%]	Max [%]
DP 2021	ESL G-481	R5	-0.6	0.3	-1.2	+0.2
DP 2021	Her CL90-8325	R5	+0.1	0.3	-0.6	+1.3
DP 2021	ESL G-485	R5	-0.9	0.3	-1.9	-0.1
DP 2021	ESL 4771-P1	R5	-1.8	0.4	-1.8	+2.2
DP 2041	ESL G-481	R2 / R3	+0.7	0.9	-2.1	+3.1
Her R8941	Her CL90-8325	R2 / R3	+0.5	0.6	-1.5	+2.2
Her R8941	ESL G-485	R2 / R3	+0.4	0.6	-1.6	+1.9
Her R8941	ESL 4771-P1	R2 / R3	+0.6	0.7	-1.0	+1.9
ESL 3915	ESL G-481	R1 / R4	-0.2	0.9	-2.9	+2.2
Her R8951	Her CL90-8325	R1 / R4	+0.2	1.1	-2.7	+4.1
Her R8951	ESL G-485	R1 / R4	+0.0	1.0	-2.9	+2.8
Her R8951	ESL 4771-P1	R1 / R4	+0.1	1.1	-2.8	+3.0

Tableau 9. Résistances ou rapports de résistances, à l'état ajusté + recuit (p.r. valeur nominale).

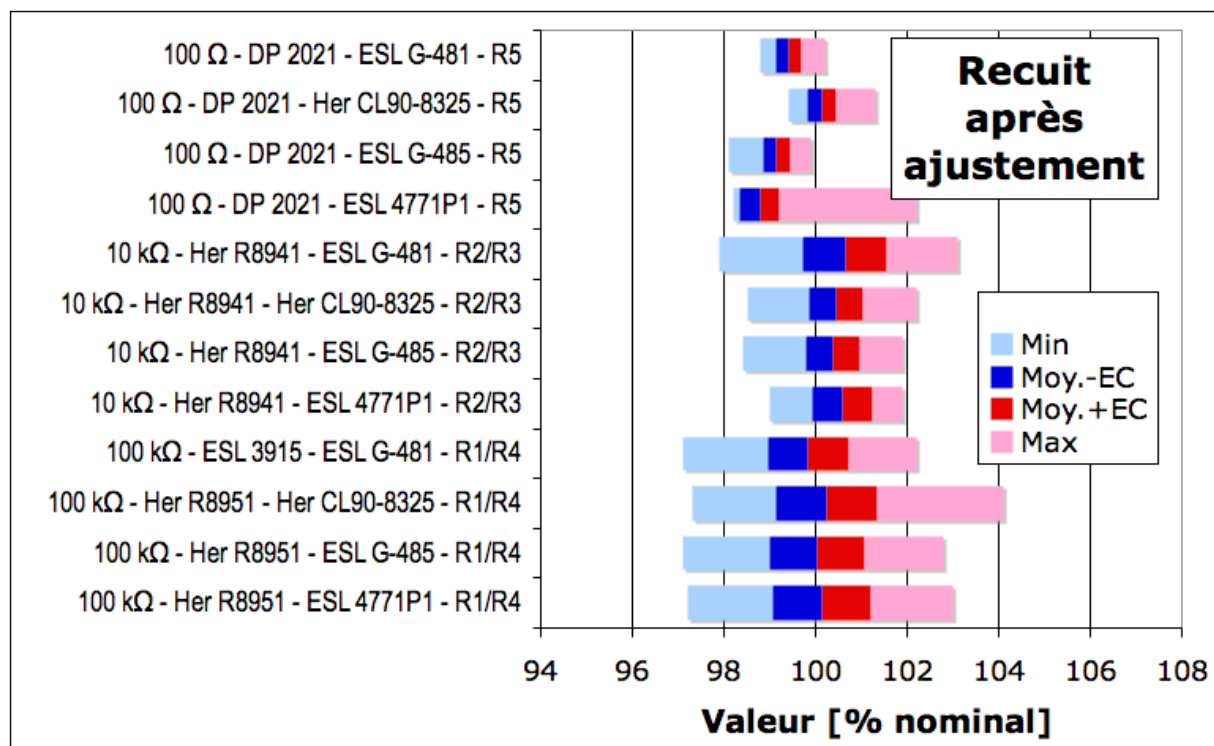


Figure 7. Résistances ou rapports de résistances, à l'état à l'état ajusté + recuit.

4. Conclusions

Cette étude a porté sur une (si possible) dernière série de production d'embases MilliNewton non RoHS, ainsi que sur un test plus complet sur un système RoHS.

- La composition 10 k Ω Her R8941 peut sans autre remplacer DP 2041, avec en prime une légère amélioration du comportement à l'ajustement. Il reste encore à caractériser son effet de jauge, qui serait idéalement faible, pour avoir une composition peu sensible aux contraintes, alors qu'on garde DP 2041 comme résistance active pour les mesures piézorésistives.
- La composition 100 k Ω Her R8951 offre des performances à l'ajustement comparables à ESL 3915, mais avec une nettement meilleure homogénéité à la sérigraphie.
- Une correction de l'épaisseur d'émulsion des masques de sérigraphie 10 k Ω (325 mesh / 50 μ m) et 100 k Ω (325 / 30, uniquement pour Her R8951) a permis d'obtenir des valeurs raisonnables pour l'ajustement passif, centrées sur $\approx 70...80\%$ de la valeur nominale. A terme, il serait intéressant de normaliser toutes les trames résistances sur 325 mesh / 40 μ m, éventuellement 30 μ m, en ajustant le layout.
- Il est difficile de départager les trois verrages sans plomb en tant que matériaux, d'autant plus que leur épaisseur est très différentes.

Ces résultats permettent de valider dans une large mesure un remplacement des produits actuels par les nouvelles compositions étudiées. Il reste cependant encore quelques tests à réaliser :

- Une étude plus complète de l'ajustement laser des nouvelles résistances (avec les nouveaux verrages) doit être réalisée.
- Le comportement à la brasure et la tenue mécanique des assemblages (*shear tests*), avec brasures Sn-Pb et Sn-Ag[-Cu], doivent encore être caractérisés.
- La stabilité des capteurs montés doit encore être examinées. Notamment, on espère obtenir des informations plus définitives sur la stabilité des embases lors des étapes finales du montage capteurs : cassage, trempage en bain de brasure et nettoyage aux ultrasons.

5. Références

- [1] "MilliNewton – Ajustement passif de l'embase version E", rapport, 2006-02-14.
- [2] "MilliNewton – Ajustement passif de l'embase version E - compléments", rapport, 2007-03-20.
- [3] "MilliNewton – Ajustement passif & qualification RoHS", rapport, 2006-11-14